

Исследование системы резервуарных вычислений на основе оптических и оптоэлектронных петель обратной связи

Павлов Д.А.¹, Попов Е.Э.¹

Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент Ковалев А.В.¹

¹Университет ИТМО

dmitriipavlov2003@gmail.com

Работа выполнена в рамках темы НИР №15055 «Многоядерный фотонный резервуарный процессор для искусственного интеллекта».

Введение

Резервуарные вычисления (РВ) – это подход машинного обучения, объединяющий рекуррентные нейронные сети с фиксированными случайными связями скрытого слоя и адаптируемыми связями выходного слоя [1]. Основная идея РВ – использование динамической системы, которая в ответ на входной сигнал порождает сигналы, линейная комбинация которых позволяет получить значения, близкие к целевым [2]. Ключевыми преимуществами РВ можно назвать упрощение процесса обучения модели, поскольку обучается только выходной слой системы [3], и возможность реализации резервуара на большом числе платформ. Выделяют два типа РВ [4]: пространственные и с временным запаздыванием, основанные на мультиплексировании входных данных во времени [4]. В настоящей работе рассматривается моделирование системы, состоящей из одномодового полупроводникового лазера с оптоэлектронной обратной связью, а также волоконной петли с полупроводниковым оптическим усилителем (ПОУ) и внутривибраторным фильтром. Приведены результаты исследования различных характеристик системы на качество решения задачи Santa Fe, емкость памяти (memory capacity, MC).

Основная часть

Исследуемая система состоит из двух частей: лазер с оптоэлектронной обратной связью характеризуется большой памятью, но слабой нелинейностью, тем временем как волоконная петля с ПОУ обладает богатой нелинейной динамикой. Комбинированная система одновременно может обладать как нелинейностью, так и большой емкостью памяти с возможностью управления данными характеристиками для обеспечения высокого качества решения различных задач. Модель системы представляет собой систему дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом.

Изначально проводился бифуркационный анализ модели. На основе зависимостей интенсивности излучения одномодового лазера, интенсивности волоконной петли от изменения тока накачки ПОУ при заданных значениях силы инжекции излучения одномодового лазера в петлю с ПОУ, коэффициента амплитудной связи между петлей с ПОУ и одномодовым лазером с оптоэлектронной обратной связью и силы обратной оптоэлектронной связи для одномодового лазера находились устойчивые состояния системы вблизи потери устойчивости стационарного состояния. Такие состояния подходят для реализации РВ и обеспечивают наилучшую производительность [6].

В работе решалась задача Santa Fe – популярная задача предсказания временных рядов интенсивности лазера в хаотическом режиме для оценки производительности РВ. Погрешность решения оценивалась как нормализованная среднеквадратичная погрешность NMSE. Исследование выполнялось для конфигураций РВ с изменяющимися характеристиками: число узлов – 40, 80. Наименьший результат погрешности для системы из 40 узлов составил 17%, для 80 узлов равен 8.3%.

Также была исследована линейная емкость памяти системы, характеризующая способность резервуара сохранять и обрабатывать информацию. Наилучшие значения емкости памяти составили $MC = 9.6$, для 80 узлов – $MC = 20.6$.

Выводы

Теоретически продемонстрировано, что система резервуарных вычислений на основе одномодового полупроводникового лазера с оптоэлектронной обратной связью и волоконной петли с полупроводниковым оптическим усилителем и внутривибраторным фильтром способна решить задачу предсказания временного ряда Санта-Фе с погрешностью 8.3% и обладает максимальной емкостью памяти, равной 20.5. При увеличении числа узлов наблюдается улучшение производительности и повышение нелинейности системы.

Литература

1. Tanaka и др. Recent advances in physical reservoir computing: A review //Neural Networks. – 2019. – Т. 115. – С. 100-123
2. Yan M. и др. Emerging opportunities and challenges for the future of reservoir computing // Nat. Commun. 2024. Т. 15, № 1. С. 2056.
3. Luginan A. и др. Recent advances in physical reservoir computing: A review //Neural Networks. – 2019. – Т. 115. – С. 100-123.
4. Larger L. и др. High-speed photonic reservoir computing using a time-delay-based architecture: Million words per second classification //Physical Review X. – 2017. – Т. 7. – №. 1. – С. 011015.
5. Appeltant L. и др. Reservoir computing based on delay-dynamical systems //These de Doctorat, Vrije Universiteit Brussel/Universitat de les Illes Balears. – 2012.
6. Dmitriev, P. S. и др. Predicting chaotic time series using optoelectronic feedback laser IX // Semiconductor Lasers and Laser Dynamics. - 2020. - С. 100-105.